

基于 Seebeck 效应的热电模块化教学装置

郑力时 易睿诚 陈博恩 郑 晓 陈 彦 徐 平

(北京航空航天大学物理学院, 北京 102206)

摘 要 针对传统热电实验教学存在的内容结构缺失及商用仪器导致的“黑匣子”化问题, 本研究研制了一套基于 Seebeck 效应的模块化教学装置。该系统采用多级热电堆串联结构以增强微弱信号, 并结合线性回归方法, 实现了多种热电偶 Seebeck 系数的高精度、可重复测量。测量结果与标准参考值具有良好一致性, 验证了装置的可靠性与测量稳定性。基于开放的结构设计和清晰的物理原理, 该装置使学生能够围绕信号放大、误差分析及热电物性开展较为系统的探究过程, 有助于在实验数据与物理建模之间建立有效联系, 为相关课程提供了一个支持探究式学习的可重构实验平台, 促进热电实验教学由验证性向探究性转变。

关键词 Seebeck 效应; 热电实验教学; 模块化教学装置; 多级热电堆测量; 线性叠加增强

DOI: 10.27024/j.wlygc.2026.01.30.05

A THERMOELECTRIC MODULAR TEACHING UNIT BASED ON SEEBECK EFFECT

ZHENG Lishi YI Ruicheng CHEN Boen ZHENG Xiao CHEN Yan XU Ping

(School of Physics, Beihang University, Beijing 102206)

Abstract To address the lack of a coherent content structure in traditional thermoelectric laboratory teaching and the “black-box” problem associated with commercially available integrated instruments, a modular thermoelectric teaching apparatus based on the Seebeck effect was developed in this study. The system employs a multi-stage series-connected thermopile to enhance weak thermoelectric signals and uses linear regression to achieve high-precision and repeatable measurements of the Seebeck coefficients of different types of thermocouples. The measured results agree well with standard reference values, verifying the reliability and measurement stability of the apparatus. Owing to its open structural design and clear physical principles, the apparatus enables students to conduct a relatively systematic inquiry process involving signal amplification, error analysis, and thermoelectric properties. It also helps students establish effective connections between experimental data and physical modeling. Therefore, this apparatus provides a reconfigurable experimental platform for inquiry-based learning in related courses and promotes the transformation of thermoelectric laboratory teaching from verification-oriented experiments to inquiry-oriented exploration.

Key words Seebeck effect; Thermoelectric laboratory instruction; Modular teaching unit; Multi-stage thermopile measurement; Linear superposition enhancement

收稿日期: 2026-01-30; 修回日期: 2026-03-16; 出版日期: 2026-05-20

通信作者: 郑晓, xiaozheng@buaa.edu.cn。

引文格式: 郑力时, 易睿诚, 陈博恩, 等. 基于 Seebeck 效应的热电模块化教学装置[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 171-179, 200.

Cite this article: ZHENG L S, YI R C, CHEN B E, et al. A thermoelectric modular teaching unit based on Seebeck effect[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 171-179, 200. (in Chinese)

习总书记在全国科技大会、国家科学技术奖励大会和中国科学院第二十一次院士大会、中国工程院第十七次院士大会指出：“当前，我国人才培养与科技创新供需不匹配的结构性矛盾比较突出。要坚持以科技创新需求为牵引，优化高等学校学科设置，创新人才培养模式，切实提高人才自主培养水平和质量^[1]。”据此，我们立足大学物理实验领域，推动大学物理实验课程改良与创新。

依赖 Seebeck 效应工作的热电偶在生产生活中的测温、发电等方面应用广泛。热电偶因成本低、响应快速、精度较高的特点，被作为广泛使用的测温装置；在小体积、高可靠性的极端发电工况下，热电偶依赖的 Seebeck 效应发电无需复杂机械结构，部件损耗小，可靠性高，如在图 1 嫦娥四号 RTG(同位素温差电池)中得到应用^[2]。

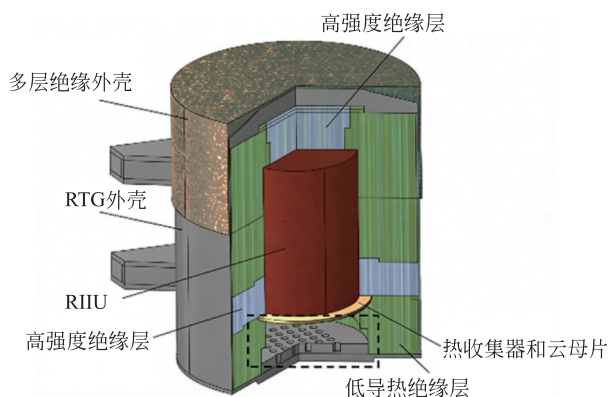


图 1 嫦娥四号 RTG 利用热电偶发电

作为一种重要的热-电信号转换途径，Seebeck 效应源于两种不同材料之间费米能级的相对大小和对温度的响应^[3]，最终在 100K 量级的温差范围内呈现简单的良好线性，在拥有丰富物理内涵的同时便于研究和应用，是大学物理实验教学的良好课题。

通过对国内大学物理实验教材与课程的调研，我们发现各大高校使用的物理实验教材热学方向的实验存在数量与深度不足；Seebeck 系数测量实验已在众多高校物理实验教学中被削减或取消，主要原因在于传统热学实验深度不够以及实验设计不完善等问题^[4]。现有方案数据处理时有的采用已被淘汰的逐差法，缺乏完整的理论支撑和误差分析环节^[5]，难以满足现代实验教学对科学性和系统性的要求^[6-11]。

同时，如图 2 的传统实验装置多为无法知晓其中细节的封闭“黑匣子”，不仅测量结果精度低、稳态难以保证，同时因为结构复杂无法有效误差分析；一些精度较高的装置又存在价格昂贵、调试复杂、不利于推广和不适于学生演示教学等问题。

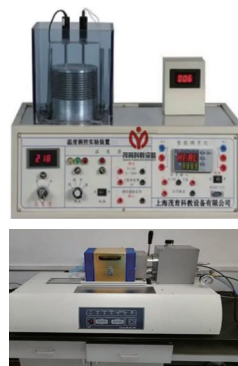


图 2 旧装置作为教学器具存在不足

本项目旨在填补热学实验教学中的空白，围绕热电偶的温差电效应测量不同材料组合的 Seebeck 系数。通过设计创新的实验平台和方法，打破传统装置的“黑匣子”限制，构建跨学科的知识桥梁，使学生能够逐步深入实验原理与过程，在“知其然”的同时“知其所以然”。

1 实验的基本原理和方法

1.1 塞贝克效应(Seebeck effect)

塞贝克效应又称第一热电效应，是热电现象的基础。当两种不同导体或半导体的接触点处于不同温度时，会在回路中产生热电动势 E 。其微观机制在于温度梯度驱动载流子由热端向冷端扩散，形成电荷分离并建立电势差。在小温差条件下，热电动势 E 与温差 ΔT 近似满足线性关系 $E = \alpha \Delta T$ ，其中 α 为 Seebeck 系数，是材料热电性能的重要参数。本实验即通过测量不同材料在特定温差下的电动势，来定量获得其 Seebeck 系数。以下为推导上述关系的具体过程^[3-5]。

本实验热电偶为金属材料制作，视为电子气模型，使用费米统计。在两种金属组成的回路中，两节点位于不同温度环境下，可直接测量一个节点处两材料的电势差。这通常包含两部分。首先，在同种金属内部，载流子倾向于从高温端流向低温端，平衡时的内建电势为汤姆孙电动势(Thomson potential)，回路中的贡献为两材料的

汤姆孙电势差;其次,在两金属接触面处有费米能级拉平效应,平衡时的内建电势差为塞贝克电压(Seebeck voltage),与温度相关^[3]。

如图3所示K型热电偶的示意图与等效电路,A为镍铬合金,B为镍硅合金,两端子处于不同温度。设A,B的有效电子密度为 n_A, n_B ,由电子统计理论,平衡时接触电压的表达式为

$$V_{\text{接触}} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \quad (1)$$

其中, k_B 为玻尔兹曼常数, e 为元电荷。

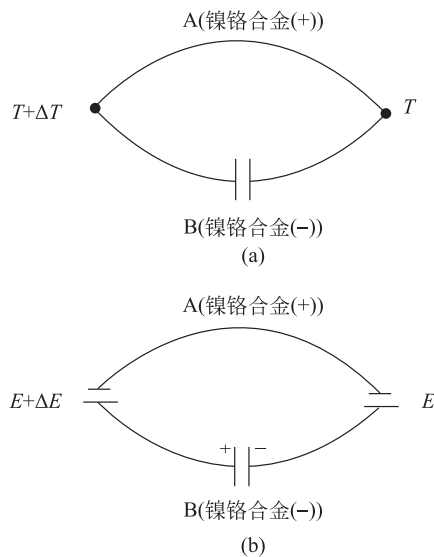


图3 K型热电偶示意图

(a) K型热电偶测温回路示意图;(b) K型热电偶等效电路图

而在回路中的同一导体内部由于温度差产生的汤姆孙电动势表达式如下

$$V_{\text{汤姆孙}} = \int_{T_c}^{T_h} \sigma dT \quad (2)$$

其中, σ 为汤姆孙系数,一般随温度变化,但在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 变化极小,可视为常数; T_c, T_h 分别为低温和高温端的温度。故 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 时,可以视上式(2)为

$$V_{\text{汤姆孙}} = \sigma(T_h - T_c) \quad (3)$$

即与温度成线性关系。

一般地,与接触电动势相比汤姆孙电动势约小一个数量级,故考虑前者作为Seebeck效应主要部分。由上式,发现节点的电动势和温度 T 成正比,相当于一个电压随温度变化的电源。一个回路中两个节点处于不同温度,相当于两个不同大小的电动势相互对抗,最终净电动势即为Seebeck效应的电动势。最终净电动势为

$$V_{\text{接触}}(T + \Delta T) - V_{\text{接触}}(T) = \frac{k_B}{e} \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \cdot \Delta T = S_{AB} \Delta T \quad (4)$$

在室温下, n_A, n_B 可视为常数,故 S_{AB} 可视为常数。如此证明了在室温下,Seebeck电动势和温度差成正比关系,线性回归较便捷。

1.2 补偿法测微小电动势

在测量电压、电流时,常会因为接入的电学仪表改变待测电路状态,使得产生分压/分流,产生“接入误差”。热电偶产生的电动势通常在微伏(μV)至毫伏(mV)量级,且其内阻不确定。本项目引入了基于补偿法原理的高精度电位差计,其核心思想是通过调节一个已知标准电压来完全抵消待测电压,因此实现了对电动势的无损测量。这种零电流测量特性避免了分压影响,可实现极高的测量精度(可达 $\pm 0.01\%$),非常适用于热电偶电动势等这种微小信号的精密测量。

如图4为UJ25型电位差计测量热电偶电动势的电路示意图。工作电路在不接入 $R_{\text{标准}}$ 、 $R_{\text{未知}}$ 支路时为标准电流,其大小可通过 $R_{\text{保护}}$ 调节。若保持工作电流大小不变,接入支路后会有

$$\begin{aligned} E_{\text{标准}} &= R_{\text{标准}} \cdot I_{\text{工作}} \\ E_{\text{未知}} &= R_{\text{未知}} \cdot I_{\text{工作}} \end{aligned} \quad (5)$$

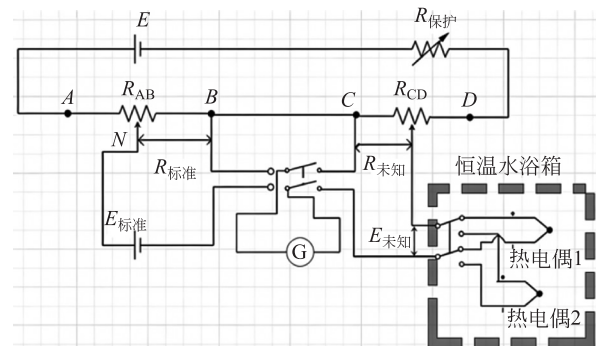


图4 改进后UJ25型电位差计电路图

此时读出 $E_{\text{标准}}, R_{\text{标准}}, R_{\text{未知}}$ 即可算出 $E_{\text{未知}}$,无接入误差。

2 实验装置模块化设计

本装置采用了模块化的设计理念,将整个系统分解为热学、电学与信号转换三大功能模块。这种设计不仅提升了系统的可维护性和可扩展性,也直观地向学生展示了热电转换的完整物理

链条,如图 5 所示。

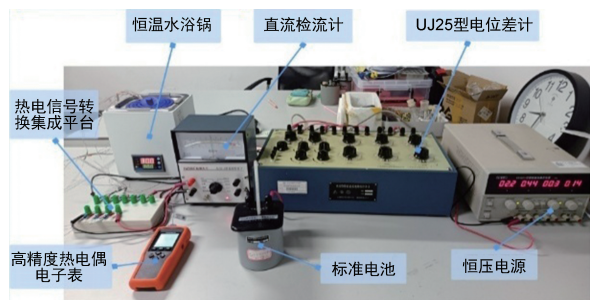


图 5 实验装置总体图

热学单元:由水浴温控装置和热电偶阵列组成。水浴锅提供稳定可控的热源,用于产生精确的温差。多通道热电偶阵列(包含 K/J/T/E 型号)确保对不同热电材料的同步测量。

电学单元:核心是 UJ25 型电位差计,利用标准电池配合检流计实现数据测量。

热电信号转换集成平台:这是连接热学和电学单元的关键。嵌入式热电偶阵列同步采集水浴锅与热电偶末端的温差,并将信号传输至电位差计进行测量。我们自制的热电信号转换集成平台可以便捷地改变待测热电堆的规模、接入热电偶的编号,通过简单地改变电位差计接口端子的插入位置即可实现对多种组合的测量。如图 6 所示。

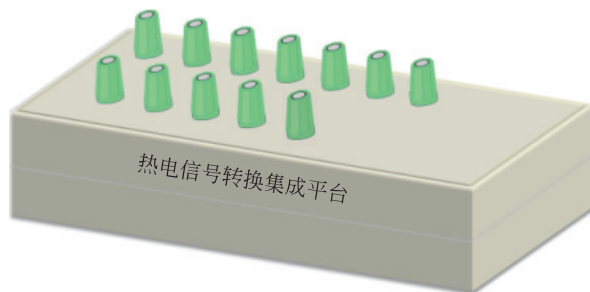


图 6 热电信号转换平台

3 实验流程

该实验装置采用 UJ25 型电位差计为核心测量单元,结合恒压电源供电、标准电池校准及 AC15-A 型直流检流计调零,构成高精度热电偶电动势检测系统,适用于 K/J/T/E 型热电偶及 K/J 型热电堆在 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 温差范围内的微小电动势测量。通过水浴温控装置与高精度测温仪的协

同作用,系统实现 0.01°C 温差精度,确保实验数据的可靠性。操作流程包括仪器连接校准(电源输出、热电偶接入、水浴设置、检流计调零、标准电动势计算及热电偶固定)和数据测量(开关切换、温差设置、温度读取及电位差计调零记录),最终完成高精度热电偶特性分析,如表 1 所示。

表 1 K/J/T/E 四型热电偶 Seebeck 系数标准值

热电偶型号	K 型	J 型	T 型	E 型
$S_{\text{标准}}/(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	41.06	52.75	42.80	63.18

为学生直观体会不同热电偶间的差异、同时获得尽可能精确的 Seebeck 系数,我们由浅入深,对比传统单根实验测量精度和创新搭建的热电堆实验的精度,我们设计了如下两个实验。

实验一: K/J/T/E 四型热电偶 Seebeck 系数测定

分别测量 K/J/T/E 四型热电偶单根在热端为 $30\sim 95^{\circ}\text{C}$ 、冷端为室温(温差 $5\sim 70^{\circ}\text{C}$)的温差电动势,通过线性拟合求 Seebeck 系数。

以水浴锅热端与室温冷端温度差 ΔT 为横轴、E 为纵轴绘制成散点图,并进行一元线性回归拟合。

拟合方程形式为: $E = \alpha \Delta T + b$ 。其中,拟合直线的斜率 α 即为热电偶的 Seebeck 系数。

实验二: 热电堆(K/J 型)Seebeck 系数测定

通过热电信号转换平台串联多根同类型热电偶放大信号,利用统计平均法提高 Seebeck 系数测量精度。详细步骤(以 K 型热电堆为例):

对于每个温度点,我们得到 5 个对应不同根数($n=1\sim 5$)的 E 值。将这些 E 值对 ΔT 作图。

对每组“n 根串联”的数据($n=1, 2, 3, 4, 5$)分别进行一元线性回归拟合,得到对应的 Seebeck 系数 α 。

对比分析:比较单根测量(实验一)与热电堆测量(实验二)得到的 Seebeck 系数,分析热电堆串联对测量精度的提升效果。

J 型热电堆实验:操作步骤完全相同,仅需在热电信号转换平台上选择 4 根 J 型热电偶串联,重复上述测量流程即可。

4 数据测量与分析

实验主要分为两个主要部分,分别针对单根热电偶和热电堆进行了系统性的测量与分析,包

括不确定度分析过程,以验证装置的有效性和教学价值。

4.1 实验一: K/J/T/E 四型热电偶 Seebeck 系数测定

4.1.1 热电偶 Seebeck 系数数据测量

实验中,通过精确控制水浴锅温度来改变热电偶两端的温差 ΔT ,并利用电位差计测量其产生的电动势 E ,得到各型号热电偶不同温差下的数据。

将多组数据点以 ΔT 为横轴、 E 为纵轴绘制成散点图,并进行一元线性回归拟合。拟合方程形式为: $E = \alpha \Delta T + b$ 。其中,拟合直线的斜率 α 即为所求的 Seebeck 系数 S_K 。

以 K 型热电偶为例,拟合直线斜率为

$$\alpha = \frac{\sum_i (\Delta T_i - \overline{\Delta T})(E_i - \overline{E})}{\sum_i (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2} \quad (6)$$

代入原始数据,得到结果为

$$S_K = \alpha = 40.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \quad (7)$$

实验结果如图 7 所示。

4.1.2 热电偶 Seebeck 系数误差分析

我们认为热电偶高精度测温仪(最小分度值为 10mK)的误差是可以忽略的,同时即使在没有消除空程误差的情况下,不会影响我们所得数据线性拟合后的斜率。由此,我们接下来用一元线性回归方法着重分析电势差的测量误差进而合成回归系数 b 的不确定度(以 K 型热电堆为例)。

下面分别是 UJ25 型电位差计和 AC15-A 型直流检流计的不确定度及他们的合成不确定度^[7]

$$u_{b(\text{电位差计})} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.02\% \times E_{\text{max}}}{\sqrt{3}} \mu\text{V} \quad (8)$$

$$u_{b(\text{检流计})} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{1.0\% \times 30\text{nA}}{\sqrt{3}} \times 10\text{k}\Omega = 1.7 \mu\text{V} \quad (9)$$

$$u_b(y) = \sqrt{u_{b(\text{电位差计})}^2 + u_{b(\text{检流计})}^2} \quad (10)$$

下面为 K 型不确定度的计算过程

$$u_a(b) = b \sqrt{\frac{1}{k-2} \left(\frac{1}{r^2} - 1 \right)} = 0.47 \mu\text{V} \quad (11)$$

$$u_b(b) = u_b(y) \sqrt{\frac{1}{k((x^2) - \bar{x}^2)}} = 0.024 \mu\text{V} \quad (12)$$

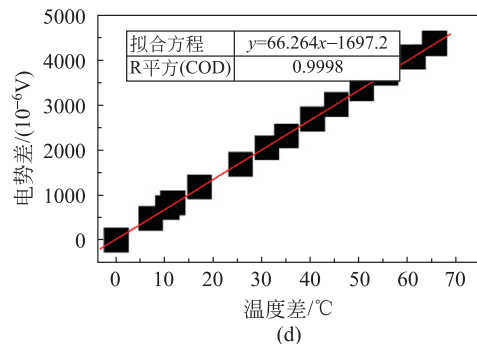
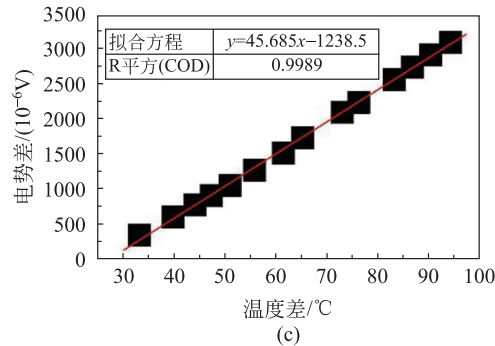
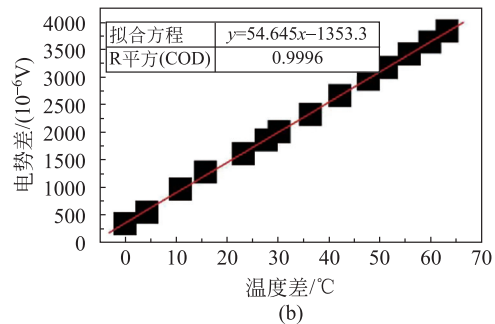
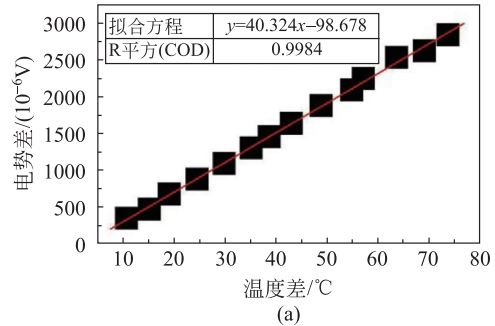


图 7 K/J/T/E 四型热电偶实验一散点回归

(a) K 型热电偶数据; (b) J 型热电偶数据; (c) T 型热电偶数据; (d) E 型热电偶数据

$$u(S_K) = u(b) = \sqrt{u_a^2(b) + u_b^2(b)} = 0.47 \mu\text{V} \quad (13)$$

其中, x, y 代表自变量(温度差)和因变量(电势差); $\Delta_{\text{仪}}$ 为仪器误差限; k 为数据点个数; r 为相关系数, 是用于衡量几组测量数据线性相关程度的统计量; u_a, u_b 为不确定度的 a, b 类评定分量, 两

者平方和的算数平方根为最终不确定度 u 。

所以 K 型热电偶 Seebeck 系数最终表达为

$$S_K \pm u(S_K) = (40.3 \pm 0.5) \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

相对误差计算

$$\begin{aligned} \delta(S_K) &= \frac{S_{K\text{测}} - S_{K\text{标}}}{S_{K\text{标}}} \times 100\% \\ &= \frac{40.3 - 41.06}{41.06} \times 100\% \\ &= -1.8\% \end{aligned} \quad (14)$$

结合标准线性回归的误差计算公式可以计算另外三型热电偶的 Seebeck 系数及相对误差, 最终的实验结果与标准值对比如表 2 所示。

表 2 实验一结果与标准值对比

热电偶型号	$S_{\text{测量}} / (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	$S_{\text{标准}} / (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$	相对误差
K 型	40.3 ± 0.5	41.06	-1.8%
J 型	54.6 ± 0.3	52.75	3.5%
T 型	45.7 ± 0.4	42.80	6.8%
E 型	66.3 ± 0.3	63.18	4.9%

实验结果表明, 该装置测定出的 Seebeck 系数与标准值吻合度较高, 相对误差均处于可接受的范围内。这充分证明了该装置在设计原理和测量方法上的可行性与准确性。

4.2 实验二: 热电堆 Seebeck 系数测定

为了克服单根热电偶测量中的随机误差和信号微弱问题, 本实验创新性地提出将多根相同型号的热电偶串联组成热电堆测量方案。这一创新不仅直观展示了 Seebeck 效应的叠加性, 也为学生理解如何通过阵列放大微弱信号提供了直观的实例。为探究该系列实验的最佳温差区间, 我们对 K/J 两型号热电偶串联堆在 5~70℃ 温差下, 步进 5℃ 进行电动势测量并回归拟合对比其 Seebeck 系数。

4.2.1 热电堆 Seebeck 系数数据测量

与实验一的数据处理不同的是, 实验二每个温度差下串联热电动势随串联热电偶数量都可以画出一个线性图像, 反映该温度差 ΔT 下总热电动势 $E_{\text{总}}$ 随热电偶数量 n 的变化关系。其关系式为

$$E_{\text{总}} = n(S_{AB} \Delta T) = k \cdot n \quad (15)$$

图像的斜率 k 除以该组数据对应温度差 ΔT 即为该温度下测得的 Seebeck 系数 S_{AB} 。

对 K 型热电堆所有温度差下的实验数据绘制

散点图并进行线性拟合分析, 如图 8、图 9 所示。

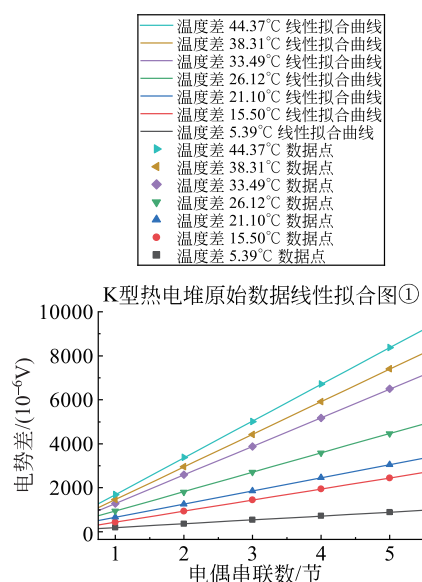


图 8 K 型热电堆各温度下电势差-串联数散点线性拟合 1

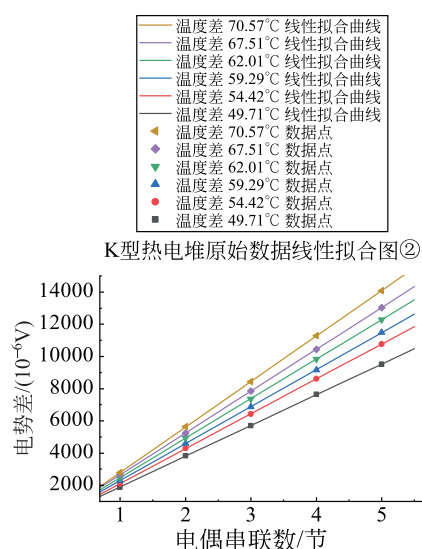


图 9 K 型热电堆各温度下电势差-串联数散点线性拟合 2

我们提取线性拟合的关键参数, 计算热电堆的 Seebeck 系数并对实验温区数据进行处理与分析。

利用线性回归的斜率 k 值可计算对应热电堆的 Seebeck 系数, 将全部组的实验结果绘制在图 11 上, 结合标准参考数值以及 10% 的标准误差线对比实验所得结果, 可充分展现实验装置测量的精确性。

从图 10 所示的 R^2 数据不难看出, 在整个实验温区线性相关性都很高。在温度差大于 15℃ 时, R^2 值均保持在 0.99996 以上, 相比于实验一

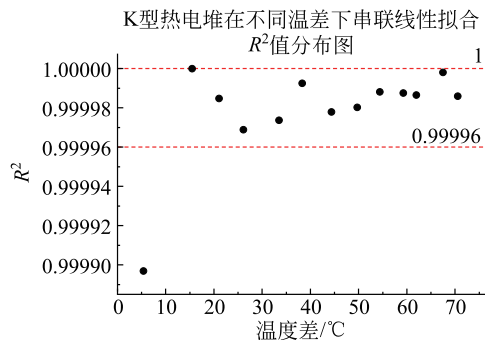
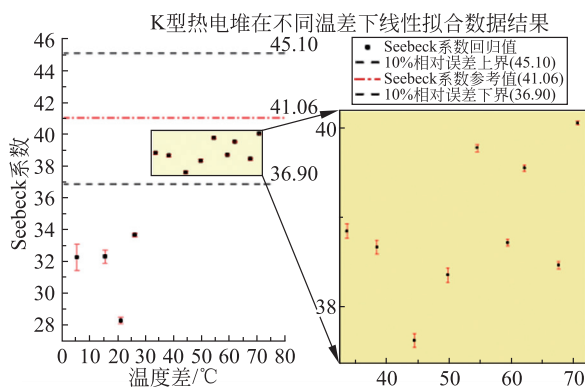
图 10 K 型热电堆实验二各温度拟合效果 R^2 值

图 11 K 型热电堆实验二各温度 Seebeck 系数拟合结果分布

的单根热电偶数据更可靠。可以得到 K 型热电偶的结论：

第一，从线性拟合 R^2 的图中可以看出随着温度升高，Seebeck 系数线性拟合程度变好，反映在图中即为数据的线性变好，相关系数 r 变大。经分析，其原因是图像斜率为单根热电偶在 ΔT 下的热电动势，每根热电偶的输出电动势有不显著随温度差增大的随机误差，即每两个数据点之间的连线斜率，其测量结果存在不随斜率 k 绝对大小 ($S_{AB} \Delta T$) 变化的误差 Δk 。随着温度差 ΔT 增大，斜率绝对值 $S_{AB} \Delta T$ 增大，相对误差 $\frac{\Delta k}{S_{AB} \Delta T}$ 减小，体现为相邻点连线的斜率 k 相对差别减小，体现为所有数据点线性变好。

第二，从串联线性拟合数据结果看，Seebeck 系数的大小 (图像直线的斜率得来) 也随着温度差变大而总体增大，趋于稳定，且在查阅的标准值上下 10% 范围内，可以认为数据计算结果较好。

第三，对于低温差区数据和标准值相差较大的问题，经分析，低温时误差较大的原因也是单根热电偶热电动势存在不随温度差显著变化的随机

误差，这使得温度较低、斜率绝对值较小时，图像线性变差且总体斜率 ($k = S_{AB} \Delta T$) 误差增大。

第四，低温区数据总体小于标准值，且隐约呈现上升趋势，有可能是因为 Seebeck 系数本身就是随温度升高而升高，数据完美反映理论结果。但实际上经过资料查阅，K 型热电偶在零下时 Seebeck 系数随温度降低而急剧下降 (-50°C 时可能降到 $30\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)，但是在实验温度范围内几乎不随温度变化，温差电动势呈现良好的线性 ($20 \sim 120^\circ\text{C}$ 下波动通常小于 $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)。这说明低温区的偏离不是 Seebeck 随温度变化的体现，而是系统误差。

综上所述，本实验我们得出 K 型热电堆可信温差区间为 $35 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

对 J 型热电堆所有温度差下的实验数据绘制散点图并进行线性拟合分析，如图 12、图 13 所示。

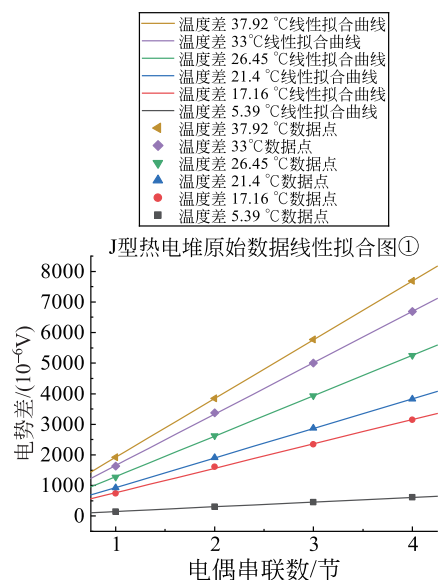


图 12 J 型热电堆各温度下电势差-串联数散点线性拟合 1

同理我们提取线性拟合的关键参数，计算热电堆的 Seebeck 系数并对实验温区数据进行处理与分析。结果如图 14 所示。

利用线性回归的斜率 k 值计算对应热电堆的 Seebeck 系数，把全部组的实验结果绘制在图 15 上，结合标准参考数值以及 10% 的标准误差线对比实验所得结果，可充分展现实验装置测量的精确性。

结合图 14、图 15 的散点位置及其关系不难发现，温度差在大于 20°C 以上时， R^2 数值稳定保持在 0.9997 以上，体现良好的线性相关性；温度差

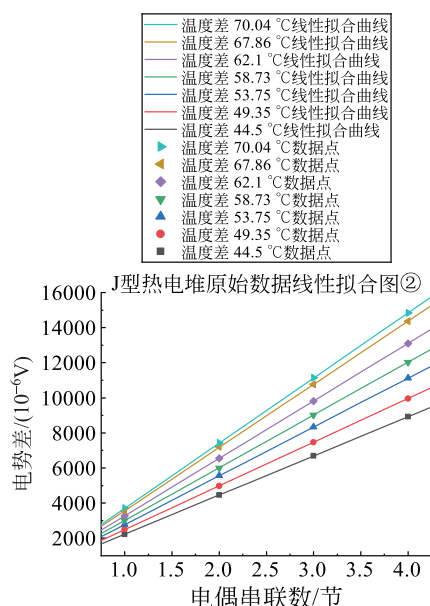


图 13 J 型热电堆各温度下电势差-串联数散点线性拟合 2

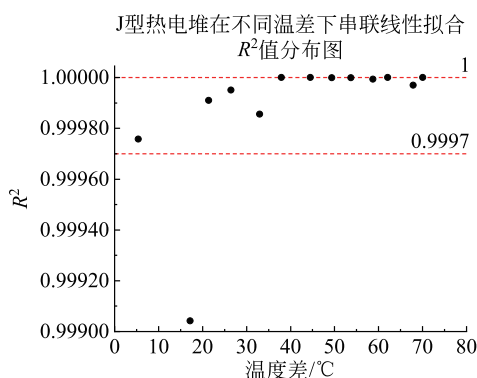
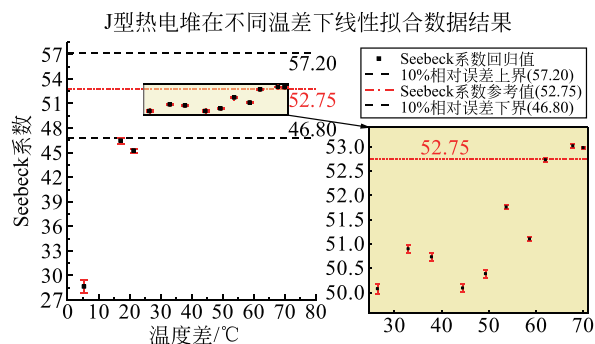
图 14 J 型热电堆实验二各温度拟合效果 R^2 值

图 15 J 型热电堆实验二各温度 Seebeck 系数拟合结果分布

在大于 25℃ 时,实验拟合数据结果保持在标准参考数据的 10% 误差内波动,且不确定度随温度增大而减小。结合上一节对 K 型热电堆的结果分析,我们可以得出 J 型热电堆可信温差区间为 25~70℃。

可见 K/J 两型热电堆的数据线性相关性以及

Seebeck 系数拟合数据结果体现出高度一致性。

4.2.2 热电堆 Seebeck 系数误差分析

在热电堆的实验中,我们选取 K 型在温度差为 70.57℃ 这一组数据进行具体数据误差分析。其拟合后的原始数据图像如图 16 所示。

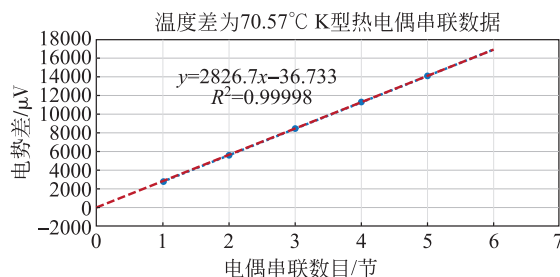


图 16 K 型热电堆实验二温差 70.57℃ 实验数据

由式(6),(8)~(15),同理可得:

$$u_b(\text{检流计}) = 1.7 \mu\text{V}$$

$$u_b(y) = 2.4 \mu\text{V}$$

$$u(\Delta T) = 0.0058^\circ\text{C}$$

$$u_a(b) = 2.7 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

$$u_b(b) = 0.47 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

$$u(b) = 2.7 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

$$S = 40.055 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

$$u(S) = 0.039 (\mu\text{V}/^\circ\text{C})$$

所以在多节 K 型热电偶串联情况下,Seebeck 系数的最终表述是

$$S_K \pm u(S_K) = (40.06 \pm 0.04) \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

相对误差 δ

$$\delta(S_K) = -2.4\%$$

J 型热电堆结果类同。两型热电堆的数据图像呈现出高度一致性,充分体现了实验装置的通用性。根据图像趋势分析,随着温度差升高,热电堆的线性性能增强,系数浮动区间也逐渐缩小,说明热电堆能够有效放大电压信号并降低单电偶的随机误差。同时可得出 K/J 两型热电堆在 35~70℃ 温差区间内具有较高的可信度。

以恒定温度差 70.57℃ 为例,K 型热电堆的电动势与串联数量之间的线性回归的 R^2 高达 0.99998。这表明在合适的温度范围内,热电堆表现出极高的稳定性和线性度。最终可得到 K 型热电堆在温度差为 70.57℃ 时,Seebeck 系数最终表述为 $S_K \pm u(S_K) = (40.06 \pm 0.04) \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。其相对误差仅为 -2.4%,不确定度相比实验一 $S_K \pm u(S_K) = (40.3 \pm 0.5) \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 精确了一个数量级,

再次验证了热电堆方案的高精度。

该优异实验结果源于理论和结构两方面的创新:随着热电偶数量的增加,电势差呈线性放大,使真实温差信号显著高于背景噪声;同时,当温度差增大时, b 和 ΔT 均增大,而两者的绝对不确定度变化不明显,因此合成不确定度显著下降。通过在不同串联数量下进行拟合,等效于对 Seebeck 系数进行多次加权平均,从而有效提升了测量的稳定性和置信度。

综上所述,该项研究基于线性叠加的统计增强机制,利用热电堆的可控规模实现了信号主动放大和系统相对误差的控制,从而实现了 Seebeck 系数更为精确的标定。

5 教学实施建议方案

5.1 实验课时安排

总学时 4 标准学时,分 2 次课完成:

(1) 第一次课(2 学时):讲解实验原理、仪器认知与预习检查,完成单根 K 型热电偶 $5\sim 70^{\circ}\text{C}$ 温差区间的热电势基础测量。

(2) 第二次课(2 学时):开展热电堆串联测量,进行数据处理、误差分析,对比不同热电偶性能并探究讨论。

5.2 实施教学方案

(1) 课前准备(实验前 1 周):发布含原理推导、操作视频、预习题的资料,新增虚拟仿真预习模块,要求学生完成装置搭建模拟操作并提交预习报告;教师通过线上平台答疑,答疑频次不低于 2 次/周。

(2) 课中实施

第一次课:教师讲解塞贝克效应、电位差计补偿法原理并演示核心操作,学生 2~3 人一组完成装置搭建、通电检查与基础数据采集,教师全程巡回指导,重点把控仪器调试与数据记录规范性。

第二次课:教师点评数据处理情况,讲解热电堆串联原理;学生完成多根 K 型热电偶串联测量,学习并进行不确定度分析,开展结果对比与探究;教师针对不同基础学生设置差异化指导清单,帮扶基础薄弱学生。

(3) 课后拓展:设置“探究不同热电偶材料的 Seebeck 系数差异”“分析温度漂移对实验结果的

影响”等开放性任务,要求学生以小论文或 PPT 提交成果,优秀成果纳入课程加分项,占比不超过总成绩 10%。

6 结语

本文针对传统热电实验教学存在的结构碎片化与仪器“黑匣子化”问题,设计了一套基于 Seebeck 效应的模块化热电教学装置,实现了多种热电偶 Seebeck 系数的高精度定量测量,验证了装置的可靠性与稳定性。通过多级串联热电堆的统计增强测量方法,显著提升了微弱电信号的测量精度与重复性,并构建了开放式模块化实验教学方案,使学生直观观察温差建立、电压响应及线性叠加关系,深化对热电堆弱信号放大机理的理解。技术层面,采用复合热电偶测温丝与高精度电子测温仪实现 0.01°C 分辨率监测,结合模块化信号转换平台和电位差计补偿法,利用实验室通用设备低成本搭建高性能系统。此外,热学与电学单元解耦设计支持灵活拓展测量内容,统计增强方法为微弱信号研究提供可复用框架。该研究通过开放化、模块化设计及创新方法,提升了热电实验精度,拓展了教学深度与广度,为物理实验教学改革提供了可推广的融合式范式。

参 考 文 献

- [1] 习近平. 在全国科技大会、国家科学技术奖励大会、两院院士大会上的讲话[EB/OL]. (2024-06-24)[2026-01-28]. <https://www.news.cn/20240624/bf94a4116f5641ffbfa1c33e8f079a2a/c.html>
- XI J P. Speech at the National Science and Technology Conference, the National Science and Technology Awards Conference and the Conference of the Chinese Academy of Sciences and Chinese Academy of Engineering [EB/OL]. (2024-06-24)[2026-01-28]. <https://www.news.cn/20240624/bf94a4116f5641ffbfa1c33e8f079a2a/c.html> (in Chinese)
- [2] LI T L, LIU Y H, ZHANG Y Z, et al. Comprehensive modeling and characterization of Chang'E-4 radioisotope thermoelectric generator for lunar mission[J]. Applied Energy, 2023, 336: 120865.
- [3] 孟庆国. 热电材料 Seebeck 系数测定中的误差分析[J]. 科技风, 2014, 17(17): 113.
- MENG Q G. Error analysis in Seebeck coefficient measurement of thermoelectric materials[J]. Technology Wind, 2014, 17(17): 113. (in Chinese)

(下转第 200 页)

- [7] 蒋智,朱俊杰,骆格旺,等.塞曼效应实验教学微视频的设计与应用[J].物理实验,2025,45(10):25-31,47.
JIANG Z, ZHU J J, LUO G W, et al. Teaching micro video for the Zeeman effect experiment[J]. Physics Experimentation, 2025, 45(10):25-31, 47. (in Chinese)
- [8] 赵海英.用示波器观察简谐振动的合成[J].大学物理实验,2001,14(4):19-20.
ZHAO H Y. Observing the compose of simple harmonic motion of oscillograph[J]. Physical Experiment of College, 2001, 14(4):19-20. (in Chinese)
- [9] 尚芃锦,李红双.投影式李萨如图形实验教学装置设计[J].实验室研究与探索,2024,43(6):47-49,98.
SHANG P J, LI H S. Design of experimental teaching device for projection based lissajous figures[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024,43(6):47-49, 98. (in Chinese)
- (上接第179页)
- [4] 贾瑜,王炜.2023年版《理工科类大学物理课程教学基本要求》内容细化修订解读[J].物理与工程,2024,34(1):3-10.
JIA Y, WANG W. Interpretation of the detailed revision of the 2023 edition of the "Basic Requirements for College Physics Curriculum in Science and Engineering"[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 3-10. (in Chinese)
- [5] 田晓兵,潘玉峰.热电偶测量温度的误差分析[J].上海计量测试,2024,51(4):71-73.
TIAN X B, PAN Y F. Error analysis of temperature measurement by thermocouple[J]. Shanghai Metrology and Testing, 2024, 51(4): 71-73. (in Chinese)
- [6] 孙向荣.不良导体导热系数的测量方法的改进[J].实验技术与管理,2006.
SUN X R. Improvement of measurement method for thermal conductivity of poor conductors [J]. Experimental Technology and Management, 2006. (in Chinese)
- [7] 唐芳,董国波.基础物理实验[M].北京:机械工业出版社,2020.
TANG F, DONG G B. Basic physics experiments[M]. Beijing: China Machine Press, 2020. (in Chinese)
- [8] 樊国梁.大学物理实验[M].北京:高等教育出版社,2015.
FAN G L. University physics experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 陈国杰,李斌,谢嘉宁.大学物理实验[M].北京:科学出版社,2018.
CHEN G J, LI B, XIE J N. University physics experiments [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [10] 浦天舒,郭英,李博,等.大学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2011.
PU T S, GUO Y, LI B, et al. University physics experiments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011. (in Chinese)
- [11] 史少辉,东艳晖.大学物理实验[M].北京:北京理工大学出版社,2020.
SHI S H, DONG Y H. University physics experiments [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020. (in Chinese)